

doi: 10.3788/gzxb20154411.1122001

# 大视场球形逆反射器的光学设计

李亚红<sup>1</sup>, 付跃刚<sup>1</sup>, 贺文俊<sup>1</sup>, 刘家源<sup>1</sup>, 顾瑛娟<sup>2</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 中国人民解放军 63861 部队, 吉林 白城 137001)

**摘 要:**在单层球形逆反射器的基础上, 提出双层球形逆反射器, 根据单个折射球面的物像位置关系和矢量场的光线追迹方法, 推导得出内外层折射率和曲率半径之间的关系, 及逆反光束的发散角与入射高度、球差之间的变化关系. 利用 ZEMAX 设计了视场  $\pm 60^\circ$ , 工作波段 632.8 nm 的双层球形逆反射器和改进的双层球形逆反射器. 优化后的两种球形逆反射器在各个视场下的点列图直径的均方根值均小于艾里斑直径  $4.632 \mu\text{m}$ , 最大球差不大于 0.045 mm, 即逆反光束最大发散角不超过 0.1 mrad. 仿真模拟结果表明, 两种球形逆反射器在各个视场下的逆反光束到达接收面的光通量分别为 48.769 lm 和 44.249 lm, 入射光通量为 54.594 lm, 逆反效率分别达到 89.33% 和 81.05%.

**关键词:**球形逆反射器; 矢量场; 光线追迹; 球差; 光通量; 逆反效率

中图分类号: O435; O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)11-1122001-5

## Optical Design of Wide-viewing-angle Spherical Retroreflector

LI Ya-hong<sup>1</sup>, FU Yue-gang<sup>1</sup>, HE Wen-jun<sup>1</sup>, LIU Jia-yuan<sup>1</sup>, GU Ying-juan<sup>2</sup>

(1 Department of Optic and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

(2 63861 Army, People's Liberation Army, Baicheng, Jilin 137001, China)

**Abstract:** Two-layer spherical retroreflector which is based on one-layer spherical retroreflector was proposed. On the basis of the object-image relationship of refracting spherical surface and ray tracing theory in vector field, the interrelation between refraction index and radius of curvature of each layer was figured out, the relations among divergence angle, incident height and spherical aberration were induced. Two-layer spherical retroreflector and its improved form were designed by ZEMAX, the field of view angle is  $\pm 60^\circ$ , and the working wavelength is 632.8 nm. The root mean square spot diameters of the two kinds of spherical retroreflectors in different fields are all less than Airy disk diameter  $4.632 \mu\text{m}$ , and the maximum values of spherical aberration is only 0.045 mm, which means that the largest divergence angle of the reflected light is less than 0.1 mrad. The simulation results show that, the luminous flux that the reflected light reaches on the receiver respectively can approach 48.769 lm and 44.249 lm, the incident luminous flux is 54.594 lm, so the reflected efficiencies respectively are 89.33% and 81.05%.

**Key words:** Spherical retroreflector; Vector field; Ray tracing; Spherical aberration; Luminous flux; Reflected efficiency

**OCIS Codes:** 080.0080; 080.1510; 080.2740; 080.4298

## 0 引言

球形逆反射器相比于角锥棱镜, 具有视场接收范围大、测量中心稳、测量范围大和准确度高等特点, 在

空间自由光通信、激光测距和跟踪测量等领域, 已逐步代替角锥棱镜而被广泛应用<sup>[1-5]</sup>. 目前应用最广的是 Leica 公司生产的 CER75 双半球型逆反射器<sup>[7]</sup>, 该逆反射器由两半球胶合组成, 前后半球半径大小由折射

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11474037)资助

第一作者: 李亚红(1990-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光学设计、偏振光理论与应用等. Email: irenel129@163.com

导师(通讯作者): 付跃刚(1972-), 男, 博导, 博士, 主要研究方向为光学设计及检测技术等. Email: fuyg@cust.edu.cn

收稿日期: 2015-05-21; 录用日期: 2015-09-11

<http://www.photon.ac.cn>

率决定( $r_1/r_2 = n - 1$ ),当折射率等于 2.000 时,可以制作成单一折射率的球形逆反射器<sup>[5-6]</sup>,称为单层球形逆反射器.由于双半球型逆反射器存在对心胶合误差,因此测量准确度较低,只能达到 3  $\mu\text{m}$ .而单层球形逆反射器不仅克服了对心胶合误差对测量准确度的影响(准确度可提高到 1  $\mu\text{m}$ ),而且装配环节和加工工艺简单,但是制作却受光学材料严格限制,必须选择高折射率材料( $n > 1.998$ ),同时还应保证材料的光学均匀性<sup>[6]</sup>,且成本较高.除此之外,还有一种利用离子扩散技术或悬浮聚合技术制作的渐变折射率型球形逆反射器<sup>[8-9]</sup>,这种球形逆反射器的折射率呈球梯度分布,工作性能好,但尺寸较小,因此常应用于内窥镜、传感器等领域.

在单层球形逆反射器的基础上,本文提出双层球形逆反射器和改进的双层球形逆反射器,根据单个折射球面的物像位置关系以及近轴条件,逐面依次类推,得到内外层折射率和曲率半径之间的关系,并采用矢量场光线追迹方法,推导出发散角与光线入射高度、球差之间的关系式,并对两种球形逆反射器进行了模拟仿真.

## 1 球形逆反射器的设计方法

球差大小直接影响着逆反光线的准直性,进而影响球形逆反射器的工作性能.在实际应用中,要求逆反光线的发散角越小越好,即准直性越好.一般要求最大发散角不超过 9 mrad,否则将失去使用价值<sup>[7]</sup>.

双层球形逆反射器由两种材料制造而成,球差能够得到很好的校正,而且相比于单层球形逆反射器,在一定程度上,也避免了高折射率材料很难保证均匀性的问题.如图 1,光线入射到双层球形逆反射器,共发生 6 次折射和 1 次反射,光路轨迹如图中 A—B—C—D—E—F—G 所示.

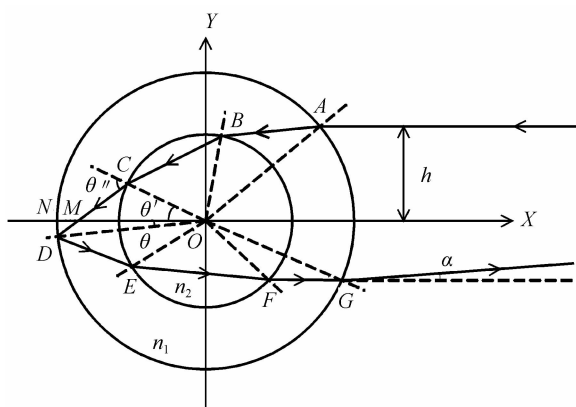


图 1 双层球形逆反射器

Fig. 1 Two-layers spherical retroreflector

根据单个折射球面的物像位置关系以及近轴条件,逐面依次类推,可得内外层折射率和内外层曲率半

径之间的关系,即

$$\frac{2}{n_1} + \frac{2r_1}{r_2 n_2} - \frac{2r_1}{r_2 n_1} = 1 \quad (1)$$

为使双层球形逆反射器具有准直逆反特性,要求入射光线必须会聚于光轴与后球面的交点  $N$  处.根据光路的几何关系,推导可得

$$\alpha = \arcsin(n_1 \cdot \sin(\theta'' - \theta - \theta')) -$$

$$\arcsin\left(\frac{h}{r_1}\right) + 2\theta \quad (2)$$

$$\Delta y = r_1 \cdot \sin \theta \quad (3)$$

$$\Delta l' = \Delta y \cdot \cot(\theta' - \theta') \quad (4)$$

其中  $\alpha$  为逆反光线相对于入射光线的发散角; $\Delta y$  为入射高度为  $h$  的光线到达后球面的会聚点相对于  $N$  点的纵向距离,即线段  $DN$ ;  $\Delta l'$  为对应的球差,即线段  $NM$ ;  $\theta, \theta', \theta''$  为图 1 所示的辅助角,分别表示为

$$\begin{cases} \theta = \langle \mathbf{OD}, \mathbf{X} \rangle \\ \theta' = \langle \mathbf{OC}, \mathbf{X} \rangle \\ \theta'' = \langle \mathbf{CD}, \mathbf{OC} \rangle \end{cases} \quad (5)$$

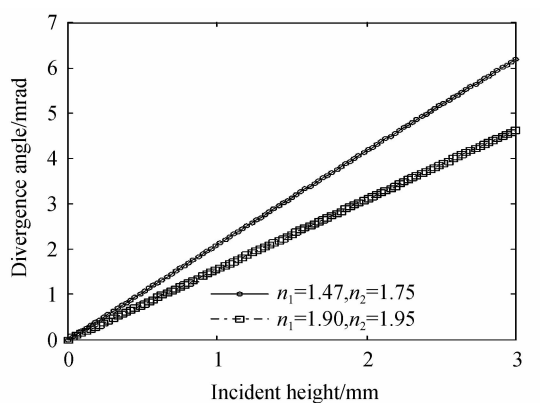
其中符号  $\langle \rangle$  表示两矢量的夹角大小.  $\mathbf{X}$  表示光轴方向,如图所示  $X$  轴正方向,  $\mathbf{OD}$  表示光线到达第 4 个介质分界面上的法向矢量,  $\mathbf{OC}$  表示光线到达第 3 个介质分界面上的法向矢量,  $\mathbf{CD}$  表示光线经过第 3 介质分界面后的透射光矢量.

采用矢量场光线追迹的方法,追迹不同入射高度的光线经过双层球形逆反射器后,逆反光线相对于入射光线的发散角大小,以及双层球形逆反射器对光线引入的球差大小.由于球形逆反射器具有良好的  $180^\circ$  旋转对称性(前半球具有良好的透过率,后半球镀有反射膜),以任意方位入射的光线,均可等效为如图 1 所示的入射情况,所以建立平面坐标系  $XOY$ . 根据矢量场中的 Snell 定律进行光线追迹<sup>[4]</sup>,即

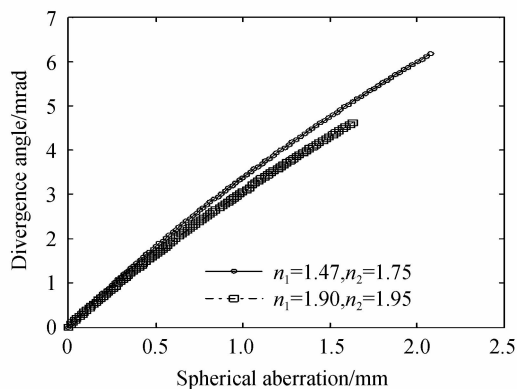
$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{i} - 2(\mathbf{i} \times \mathbf{N})\mathbf{N} \\ \mathbf{t} = \frac{n_1}{n_2} \mathbf{i} + \left( \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_i - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (1 - \cos^2 \theta_i)} \right) \mathbf{N} \\ \cos \theta_i = -\mathbf{i} \times \mathbf{N} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{i}$  为入射光矢量,  $\mathbf{N}$  为介质分界面的法向矢量,  $\theta_i$  为入射角,  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{t}$  分别为反射光矢量和透射光矢量. 根据式(6),可以得到不同入射高度的光线到达各个介质分界面上的入射角、入射光矢量、透射角、透射光矢量、反射角、反射光矢量以及到达各个分界面上的法向矢量,同时,也可求得式(5)中的  $\theta, \theta', \theta''$ ,进而求得光线经过球形逆反射器的逆反光线的发散角  $\alpha$  和球差  $\Delta l'$ .

结合 MATLAB 编程辅助计算,根据式(1),分别取  $n_1 = 1.90, n_2 = 1.95, r_1 = 22 \text{ mm}, r_2 = 11 \text{ mm}$  和  $n_1 = 1.47, n_2 = 1.75, r_1 = 30 \text{ mm}, r_2 = 15 \text{ mm}$ , 发散角与入射高度和球差之间的关系曲线如图 2.



(a) Relation between divergence angle and incident height



(b) Relation between divergence angle and spherical aberration

图2 发散角与入射高度和球差之间的变化关系

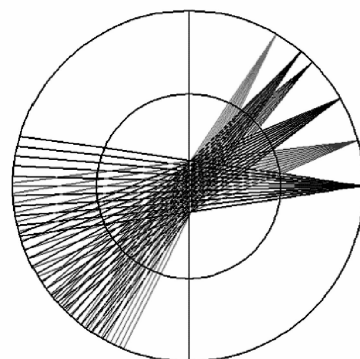
Fig. 2 Relations of divergence angle and incident height and spherical aberration

从图2可以看到,发散角与入射高度近似成线性正比关系,并随着球差的增大而单调递增.由此可知,要使球形逆反射器的逆反效果好,必须使出射光线的发散角小,除控制光线的入射高度以外,还必须在球形逆反射器的设计过程中严格控制球差.球形逆反射器的设计过程为:1)根据工作波长指标可以初步选定可用的光学材料;2)由式(1)初步确定内外层半径大小,确定双层球逆反射器的初步结构参量;3)结合光学设计软件 ZEMAX,对初始参量进行优化调整,使系统的球差值达到最小.但在实际设计过程当中发现,只有使用折射率较高的材料( $n > 1.800$ ),球差才能得到较好地校正,这与像差校正理论相符,但是成本较高.因此,本文又提出一种改进的双层球逆反射器.由于球差可通过离焦来补偿校正,在由普通材料(ZF12 和 QF1)制造而成的双层球后方增加一个球面反射镜,使得入射光线经过双层球后完全聚焦于球面反射镜.

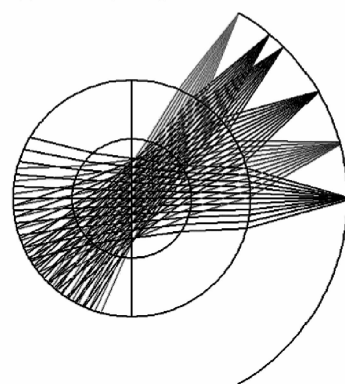
## 2 光学设计结果

球形逆反射器属于无焦光学系统,整个系统可看作是一个放大倍率等于1的望远系统.系统设计要求为:1)视场接收范围尽可能地大;2)逆反效率高;3)易加工,且制造成本低;4)装调简单.根据设计要求,按照

第1节所述设计方法进行初始计算,并结合光学设计软件 ZEMAX,设计了如图3(a)和图3(b)所示的球形逆反射器,工作波长为632.8 nm,其他参量见表1.



(a) Two-layers spherical retroreflector



(b) Improved two-layers spherical retroreflector

图3 光学系统设计结果

Fig. 3 2D Layout of optical system

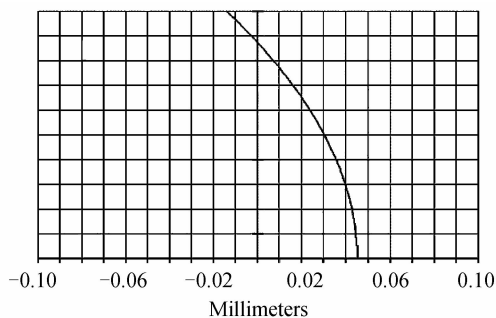
表1 球形逆反射器的参量

Table 1 Parameters of spherical retroreflector

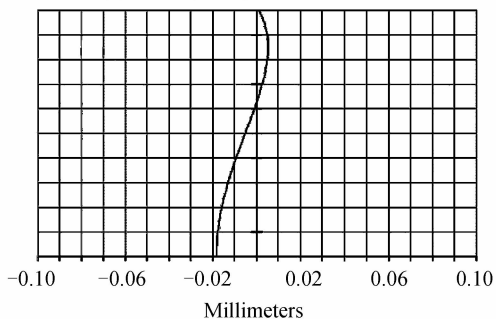
Parameters	Two-layers spherical retroreflector	Improved two-layers spherical retroreflector
Outer radius/mm	29.956	11.630
Outer refractive index	1.90	1.76
Inner radius/mm	15.784	5.850
Inner refractive index	1.95	1.54
Spherical reflecting radius/mm	Invalid	21.019
Field of view/(°)	±60	±60
Focal length/mm	30.000	21.000
F number	4.277	3.002

结构;图4(a)为系统在工作波长下,各个孔带的球差值在 $-0.025 \text{ mm} \sim +0.035 \text{ mm}$ 之间的变化,其中边缘带球差为 $-0.022 \text{ mm}$ ,中心球差为 $+0.034 \text{ mm}$ ,在 $0.707$ 带球差校正为 $0 \text{ mm}$ ;图5(a)为各个视场的点列图,各个视场点列图半径的均方根值(Root Mean Square, RMS)均远远小于艾里斑半径( $3.302 \mu\text{m}$ ).

图3(a)为设计的双层球形逆反射器的二维结构图;图4(b)为系统在工作波长下,各个孔径的球



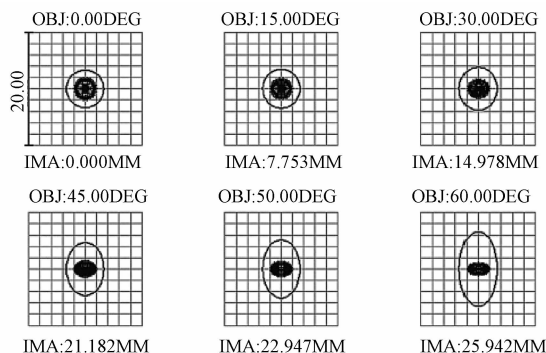
(a) Two-layers spherical retroreflector



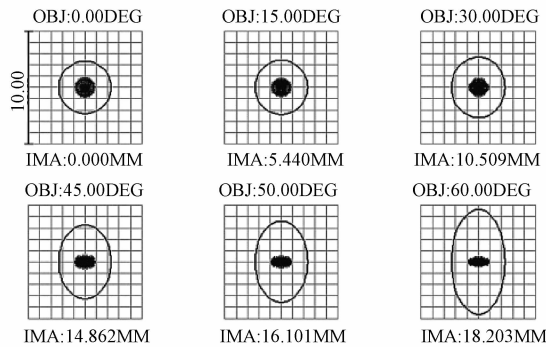
(b) Improved two-layers spherical retroreflector

图4 光学系统的球差曲线

Fig. 4 Spherical aberration curve of optical system



(a) Two-layers spherical retroreflector



(b) Improved two-layers spherical retroreflector

图5 光学系统的点列图

Fig. 5 Spot diagram of optical system

差值在  $-0.018 \text{ mm} \sim +0.006 \text{ mm}$  之间,其中边缘带球差为  $+0.001 \text{ mm}$ ,中心球差为  $-0.018 \text{ mm}$ ,在  $0.707$ 带球差校正为  $0 \text{ mm}$ ;图5(b)为各个视场的点列图,各视场的点列图直径的RMS值均小于  $4.632 \mu\text{m}$  (艾里斑直径).

### 3 FRED 仿真结果

以到达接收面上的光通量以及相对于入射光通量的逆反效率作为球形逆反射器工作性能的度量参量,在FRED中仿真模拟球形逆反射器的实际工作状态,前球面镀标准增透膜,透射率为96%,后球面镀金属反射膜,一般是反射率为97%的银膜.光源采用632.8 nm激光,仿真模拟过程中对激光功率进行了归一化( $P=1 \text{ W}$ ).分别考察了设计的两种不同结构形式的球形逆反射器在各个视场接收角范围内到达接收面上的光通量  $\Phi'$ ,以及相对于入射光通量  $\Phi_0$  的逆反效率  $\eta(\Phi'/\Phi_0)$ .其中入射光通量是指入射激光光束直接到达接收面上的光通量  $\Phi_0=54.59446(\text{lm})$ .仿真模拟结果见表2.

表2 球形逆反射器的仿真模拟结果

Table 2 The simulation results of the spherical retroreflectors

Field of view	Parameters	Two-layers spherical retroreflector	Improved two-layers spherical retroreflector
$0^\circ$	$\Phi'/\text{lm}$	48.76908	44.24649
	$\eta$	89.33%	81.05%
$15^\circ$	$\Phi'/\text{lm}$	48.76908	44.24690
	$\eta$	89.33%	81.05%
$30^\circ$	$\Phi'/\text{lm}$	48.76908	44.24828
	$\eta$	89.33%	81.05%
$45^\circ$	$\Phi'/\text{lm}$	48.76908	44.24922
	$\eta$	89.33%	81.05%
$60^\circ$	$\Phi'/\text{lm}$	48.76908	44.24942
	$\eta$	89.33%	81.05%

仿真模拟发现,设计的双层球形逆反射器和改进的双层逆反射器,在各个视场接收角范围内的光通量逆反效率分别可达89.33%和81.05%以上,从探测接收的角度而言,本文所提出的两种不同结构形式的球形逆反射器均能满足要求<sup>[13]</sup>.而且无论光线是从哪个视场接收角范围入射到两种球形逆反射器,接收到的光通量均相等,即不同方位入射,其逆反效果完全相同.这使得在空间自由光通信、激光测距和激光跟踪中,从不同方位均能自由通信或发现、跟踪目标.

### 4 结论

本文所设计的双层球形逆反射器在  $\pm 60^\circ$  视场范围内,点列图直径小于  $3.302 \mu\text{m}$ ,球差值不大于  $0.045 \text{ mm}$ ,即出射光束的最大发散角不超过  $0.1 \text{ mrad}$ .改进的双层球形逆反射器,在  $\pm 60^\circ$  视场范围内,最大球差不超过  $0.02 \text{ mm}$ .以光通量的逆反效率作为球形逆反射器工作性能的度量参量,仿真模拟发现:两种球形逆反射器的光通量分别能达到89%和

81%以上的逆反,即从探测接收的角度而言,本文所提出的两种不同结构的球形逆反射器均能满足要求。

#### 参考文献

- [1] GOETZ P, RABINOVICH W, MAHON R, *et al.* Modulating retro-reflector lasercom systems at the naval research laboratory[C]. Military Communications Conference, 2010, 2010: 1601-1606.
- [2] LIN Yong-bing, ZHANG Guo-xiong, LI Zhen, *et al.* An improved cat's-eye retroreflector used in a laser tracking interferometer system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, **14**(6): N36.
- [3] HOFHERR O, WACHTEN C, MULLER C, *et al.* Active retroreflector to measure the rotational orientation in conjunction with a laser tracker [C]. Nano Science Engineering, International Society for Optics and Photonics, 2012, 2012: 84660J.
- [4] HE Wen-jun, FU Yue-gang, ZHENG Yang, *et al.* Polarization properties of a corner-cube retroreflector with three-dimensional polarization ray-tracing calculus [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(19): 4527-4535.
- [5] TAKATSUJI T, GOTO M, OSAWA S, *et al.* Whole-viewing-angle cat's-eye retroreflector as a target of laser trackers[J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, **10**(7): N87.
- [6] YANG B, FRIEDSAM H. Ray-tracing studies for a whole-viewing-angle retroreflector[J]. *Argonne National Lab*, 1999.
- [7] LIN Yong-bing, ZHANG Guo-xiong. Design and optimization of a cat's-eye retroreflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1245-1250.  
林永兵,张国雄.猫眼逆反射器的设计与优化[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1245-1250.
- [8] KOIKE Y, KANEMITSU A, SHIODA Y, *et al.* Spherical gradient-index polymer lens with low spherical aberration[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(16): 3394-3400.
- [9] YI You-min, ZHANG Yu-chuan, XIA Ru, *et al.* The manufacture of polymer gradient refractive index spherical microlens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 425-428.
- 易佑民,章于川,夏茹,等. 聚合物梯度折射率微球透镜的研制[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4): 425-428.
- [10] ZHANG Guo-xiong, LIN Yong-bing, LI Xing-hua. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1030-1036.  
张国雄,林永兵,李杏华,等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1030-1036.
- [11] TIAN Zhou-guo, WANG Jiang, ZHONG Ming. Cat's eye effect and it's application[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(4): 16-18.  
田国周,王江,钟鸣,等. “猫眼”效应及其应用[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(4): 16-18.
- [12] LI Zhan. The study of a wide view field angle cat's eye structure optocetro-modulator[D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology, 2008.  
李展. 大视场“猫眼”结构光学逆向调制器研究[D]. 电子科技大学, 2008.
- [13] HANDEREK V, LAYCOCK L. Feasibility of retroreflective free-space optical communication using retroreflectors with very wide field of view[C]. European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security. International Society for Optics and Photonics, 2004: 1-9.
- [14] YUAN Jing-he, CHEN Bo, ZENG Hong-jun, *et al.* Properties study of the micro-prism array retro-reflector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(11): 1023-1027.  
袁景和,陈波,曾红军,等. 微棱镜阵列型定向反射器特性[J]. *光子学报*, 1998, **27**(11): 1023-1027.
- [15] REN D, LAWTON K, MILLER J. Application of cat's-eye retroreflector in micro-displacement measurement [J]. *Precision Engineering*, 2007, **31**(1): 68-71.
- [16] NAKAMURA O, GOTO M, TOYODA K, *et al.* A laser tracking robot-performance calibration system using ball-seated bearing mechanisms and a spherically shaped cat's-eye retroreflector[J]. *Review of Scientific Instruments*. 1994, **65**(4): 1006-1011.